

Chapitre 5

Des études comportementales à l'imagerie cérébrale...

5.1 Introduction

En rappelant que les mots polymorphémiques d'une même famille et leur racine partagent généralement des caractéristiques orthographiques et sémantiques, l'effet d'amorçage morphologique observé dans de nombreuses études pourrait reposer sur le partage de ces caractéristiques, comme cela est suggéré dans les modèles connexionnistes. Cependant, cela n'est pas aussi simple : comme nous l'avons présenté dans le chapitre précédent, il est possible d'observer un effet d'amorçage morphologique même si le lien sémantique partagé entre la cible et l'amorce est opaque (par ex. *vignette-vigne*). Par ailleurs, le partage de caractéristiques orthographiques ne peut expliquer à lui seul l'effet d'amorçage morphologique, comme par exemple quand celui-ci se produit en l'absence d'amorçage orthographique (voir par ex. Longtin, Segui et Hallé, 2003). Néanmoins, et comme nous allons le voir dans les sections qui suivent, ces résultats dépendent pour beaucoup des procédures expérimentales employées et l'absence d'un effet d'amorçage sémantique ne coïncide pas nécessairement avec l'absence d'un amorçage orthographique dans une même expérience ; rien ne nous informe donc sur la possibilité que l'amorçage morphologique ne

repose pas sur la combinaison d'un recouvrement orthographique et sémantique.

L'étude présentée dans ce chapitre a pour but de mieux comprendre si l'amorçage morphologique est un effet à part entière, dû à une organisation et à des traitements cognitifs spécifiques pour les mots polymorphémiques, ou s'il repose sur les mêmes structures qui sous-tendent les traitements des mots qui partagent un lien sémantique ou orthographique. Dans le but d'aborder cette question nous avons utilisé la technique d'imagerie cérébrale par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) lorsque des participants lisent des séries de mots qui partagent soit un lien morphologique, sémantique ou orthographique.

5.2 L'amorçage morphologique : un effet formel et/ou sémantique ?

5.2.1 Amorçage morphologique et amorçage orthographique

Une étude princeps pour tester la nature morphologique ou orthographique des effets d'amorçage obtenus entre un mot polymorphémique et sa cible a été proposée par Murell et Morton (1974). Ces auteurs ont observé que suite à un apprentissage d'une liste de mots par des participants, de meilleures performances sont obtenues dans une tâche de reconnaissance de mots lorsque ces derniers sont accompagnés dans la liste d'un autre mot qui leur est morphologiquement lié (par ex. *cars-car*, 'voitures-voiture' en français). En revanche, lorsque le mot à reconnaître est accompagné dans la liste d'un mot partageant un lien uniquement orthographique (par ex. *card-car*, 'carte-voiture'), aucune amélioration sur les temps de reconnaissance n'est observée. Ce résultat montre clairement que l'effet d'amorçage morphologique ne peut être réduit au partage de caractéristiques orthographiques entre un mot polymorphémique et sa racine. D'autres études ont montré l'indépendance de l'effet d'amorçage morphologique vis-à-vis d'un simple effet orthographique. Par exemple, Feldman et Moskovjevic (1987) ont proposé une expérience qui teste l'amorçage morphologique quand l'amorce et la cible sont écrites dans deux alphabets dif-

férents (l'alphabet romain et cyrillique, tous deux utilisés en serbo-croate). Bien qu'il n'y ait aucun recouvrement formel entre l'amorce et la cible, les auteurs ont quand même observé un effet d'amorçage morphologique (voir aussi Frost, Forster & Deutch 1997, pour une expérience similaire réalisée en hébreu). Ces travaux suggèrent donc que l'effet d'amorçage morphologique est un effet distinct de celui attribuable à un simple recouvrement formel entre une amorce et sa cible. Néanmoins, les procédures d'amorçage non masqué utilisées dans les expériences décrites ci-dessus sont susceptibles de conduire à des biais dans les effets obtenus, dont l'origine est la mise en place de stratégies de la part des participants. Napps et Fowler (1987) montrent cela à partir d'une expérience d'amorçage non masqué avec les conditions expérimentales suivantes :

1. Morphologique (*ribbed-rib* du verbe *to rib* 'taquiner' en français) ;
2. Identique (*rib-rib*, 'taquiner' en français) ;
3. Orthographique (*ribbon-rib*, 'ruban-taquiner') ;
4. Non liée (*gauge-rib*, 'jauge-taquiner').

Les auteurs ont comparé les temps de reconnaissance des mots cibles dans chacune de ces 4 conditions lorsque le pourcentage de paires amorce-cible partageant des propriétés formelles était de 75 % et de 25 %. Les résultats observés dans la condition à 75 % indiquent un effet d'amorçage facilitateur de même ampleur pour les conditions Identique et Morphologique. La condition Orthographique produit également un effet d'amorçage facilitateur qui est cependant moins important que celui observé dans les deux conditions précédentes. Lorsque 25% des paires amorce-cible proposées sont liées formellement, les temps de réponse des conditions Identique et Morphologique indiquent un effet d'amorçage facilitateur. La condition Orthographique ne produit quant à elle aucun effet d'amorçage, ceci étant dû à des temps de réponse plus courts dans la condition Non liée. En fait, entre les deux conditions d'expérimentation (75 % et 25 % de paires liées), les temps de réponse sur les cibles précédées d'une amorce orthographiquement liée sont restés stables. Par contre, les temps de réponse pour les cibles précédées d'une amorce de la condition Identique ou Morphologique sont plus longs lorsque les facteurs stratégiques

sont contrôlés (25 % de paires amorce-cible liées). Ces résultats vont dans le sens d'un effet de l'amorçage morphologique différent de celui de l'amorçage orthographique, et d'une indépendance de ce dernier vis-à-vis de facteurs stratégiques. Etant donné le rôle que peut jouer les facteurs stratégiques sur l'amorçage morphologique, ce dernier effet ne reflète pas nécessairement des propriétés d'organisation des unités lexicales morphologiques *per se*. Pour mieux comprendre les bases de l'amorçage morphologique, d'autres études ont été menées utilisant un paradigme d'amorçage qui limite la mise en place de stratégies : l'amorçage masqué. Nous allons voir que les résultats obtenus dans ce type d'étude sont cependant complexes en ce qui concerne cette fois-ci l'amorçage orthographique. Une fois encore l'interprétation des effets d'amorçage morphologique est difficile.

L'amorçage orthographique peut produire un effet facilitateur ou inhibiteur sur les temps de réponse, en fonction du protocole expérimental utilisé et des attributs lexicaux manipulés. Par exemple, Segui et Grainger (1990), utilisant un protocole d'amorçage non masqué, observent un effet d'amorçage inhibiteur entre une amorce et sa cible orthographiquement liées lorsque l'amorce est de fréquence inférieure à celle de la cible (*char-chat*). Par contre, lorsque l'amorce possède une fréquence supérieure à celle de la cible (*chat-char*), aucun effet d'amorçage n'est observé. Donc, lorsque l'on utilise un paradigme qui diminue la possibilité que les participants mettent en place des stratégies, les effets d'amorçage entre les conditions orthographique et morphologique semblent distincts. Néanmoins, la variabilité de l'effet d'amorçage qu'il est possible d'observer dans la condition orthographique (absence d'effet ou inhibition) rend difficile l'interprétation de la distinction entre cet effet et celui produit dans la condition d'amorçage morphologique. Par ailleurs, aucune indication quant au rôle du partage de caractéristiques sémantiques, entre une amorce et une cible morphologiquement liées, n'est apportée dans ces études.

5.2.2 Amorçage morphologique et amorçage sémantique

Des études sur les effets d'amorçage ont également été menées dans le but de comprendre si l'amorçage morphologique est sous-tendu par des processus distincts de ceux de

l'amorçage sémantique. Dans ce contexte, Bentin et Felman (1990) ont observé un effet d'amorçage sémantique lorsque l'amorce précède directement la cible, mais aucun effet lorsque 10 items séparent l'amorce de la cible sémantiquement liée. En revanche, concernant l'effet d'amorçage morphologique, celui-ci est comparable quelque soit le nombre d'item (de 0 à 15) qui sépare l'amorce polymorphémique de sa racine-cible. Ainsi, il semblerait que l'effet d'amorçage morphologique persiste plus longtemps que l'amorçage sémantique, et que ces deux effets soient alors distincts. Il faut cependant noter que le choix du paradigme expérimental peut influencer les résultats obtenus dans la condition sémantique, bien que cela ne remette pas complètement en question la distinction qui semble exister entre les deux sortes d'amorçage (sémantique et morphologique). Par exemple, Rastle, Davis, Marslen-Wilson et Tyler (2000), en utilisant une procédure d'amorçage masqué, observent un effet d'amorçage morphologique en dehors de tout effet pour la condition sémantique. Par contre, dans le cadre d'une procédure d'amorçage non masqué, des effets d'amorçage sémantique et morphologique sont observés, le premier étant beaucoup plus tranché que le second.

Une seconde expérience en amorçage proposée par Napps (1989)²⁶ montre aucun effet d'amorçage entre des paires amorce-cible qui sont synonymes (*faute/erreur*). En revanche, un effet d'amorçage est observé quand l'amorce et la cible partagent un lien associatif (*couteau-manger*), indépendamment de l'intervalle de temps qui sépare l'amorce de la cible. Pour conclure que l'amorçage morphologique est distinct de l'amorçage sémantique, il faudrait montrer que les conditions *morphologique* et *synonyme* sont les plus équivalentes d'un point de vue sémantique. Cela reste difficile à déterminer.

En résumé, la distinction entre les effets d'amorçage orthographique et morphologique d'une part, et entre les effets d'amorçage sémantique et morphologique d'autre part, est toujours très délicate à interpréter. Différents facteurs autres que ceux relatifs à une organisation lexicale spécifique pour les conditions testées pouvant intervenir dans les

²⁶Expérience dans laquelle l'intervention possible de stratégies de la part des sujets est minimisée : 6.26 % des stimuli sont reliés.

expériences que nous venons de présenter. Par ailleurs, il reste toujours à déterminer le rôle possible d'un recouvrement combiné des caractéristiques orthographiques et sémantiques sur l'effet d'amorçage morphologique. Pour sortir de ces difficultés qui sont inhérentes à l'utilisation d'expérimentations comportementales classiques, nous allons nous intéresser aux études menées en neuropsychologie et en imagerie cérébrale et sur ce qu'elles nous apprennent quant aux effets d'amorçage morphologiques, sémantiques et orthographiques.

5.3 Que nous disent les études en neuropsychologie et imagerie cérébrale ?

Dans le cadre des études qui visent à déterminer le rôle de la procédure de décomposition dans l'accès au sens des formes fléchies régulières, des indications quant aux structures cérébrales qui sous-tendent le traitement cognitif des formes polymorphémiques sont proposées. Par le biais de ces études, on sait ainsi que des lésions cérébrales dans le gyrus frontal inférieur gauche sont associées à des difficultés dans le traitement des formes verbales régulières, avec par exemple une absence d'effet d'amorçage entre des formes comme *walked* et *walk* pour les patients concernés. En revanche, les performances observées dans le traitement des formes verbales irrégulières sont correctes (Tyler, Marslen-Wilson & Stamatakis, 2004 ; Marslen-Wilson & Tyler, 1997). Il est également possible d'observer à l'opposé chez certains patients des performances faibles dans le traitement des formes fléchies irrégulières et correctes pour les formes fléchies régulières. Les zones cérébrales concernées par ce type de schéma sont néanmoins plus controversées. Dans beaucoup de cas des lésions qui sont en dehors du gyrus frontal inférieur gauche pourraient être concernées, à savoir des lésions dans le lobe temporal antérieur gauche (Tyler, de Mornay Davies, Anokhina, Longworth, Randall & Marslen-Wilson, 2002). Cette double dissociation est généralement interprétée en rapport avec un amorçage morphologique basé sur la procédure de décomposition morphophonologique qui engage le gyrus frontal inférieur gauche. Une étude de Longworth, Marslen-Wilson, Randall et Tyler (2005) montre également le

rôle du gyrus frontal inférieur gauche dans la procédure de décomposition. En effet, ces auteurs observent que les décisions lexicales sur un mot cible précédé d'un mot polymorphémique (*blamed-accuse*, 'blamé-accuser') sont ralenties chez des patients présentant des lésions dans le cortex péri-sylvien (c'est-à-dire le gyrus frontal postérieur inférieur gauche et parfois le gyrus temporal supérieur gauche). En revanche, les temps de réponse sur un mot cible sont facilités dans le cas d'une amorce sémantiquement liée monomorphémique (*hope-wish*, 'espérer-souhaiter') ou irrégulière (*shook-tremble*, 'secoué-trembler'). Ces observations indiquent que la procédure de décomposition sur le mot *blamed* se réalise difficilement ou pas du tout, ce qui rend difficile l'accès au sens de la racine *blame*, et compromet l'amorçage sémantique consécutif comme dans les deux autres conditions expérimentales. En résumé, ces études montrent un rôle crucial de la région frontale inférieur gauche dans le traitement des formes fléchies. Une étude réalisée par Bozic, Marslen-Wilson, Stamatakis, Davis et Tyler (2004) indique que cette localisation est également sollicitée dans le traitement des mots polymorphémiques dérivés. Ces auteurs ont étudié les effets d'amorçage dans le cadre d'une étude en imagerie fonctionnelle avec la présentation de paires de mots amorce-cible qui partagent les liens suivants :

1. Un lien morphologique sémantiquement transparent (*bravely-brave*, 'courageusement-courage' en français) ;
2. Un lien morphologique sémantiquement opaque ²⁷ (*archer-arch*, 'archer-voute') ;
3. L'amorce et la cible sont identiques (*quest-quest*, 'quête')
4. Un lien orthographique (*antique-ant*, 'antique-fourmi')
5. Un lien sémantique (*accuse-blame*, 'accuse-blâme').

Dans le protocole expérimental, 18 items séparent l'amorce de la cible. Les résultats observés montrent que l'amorçage morphologique s'accompagne d'une réduction d'activation significative dans le gyrus frontal gauche, que la relation sémantique soit transparente

²⁷Rappelons ici que dans ces paires de mots l'amorce est étymologiquement liée à sa racine cible, mais le lien sémantique n'est pas évident.

ou opaque. Ceci n'est pas observé pour les conditions orthographique, sémantique et identique.

Un résultat divergeant de ceux de Bozic et al., (2004).

Peu d'études en imagerie ont étudié les corrélats neuronaux des effets d'amorçage morphologique, sémantique ou orthographique. Néanmoins, nous pouvons citer en plus de celle de Bozic et al. (2004), l'étude de Devlin, Jaminson, Matthews et Gonnerman (2004). Ces auteurs proposent une étude en imagerie cérébrale dans les trois conditions d'amorçage citées précédemment, avec un protocole d'amorçage masqué. Les principales activations sont observées dans l'hémisphère gauche et plus particulièrement dans les régions suivantes : le gyrus angulaire postérieur pour les trois conditions d'amorçages (AB 39, région pariétale inférieure), la région occipito-temporale pour l'amorçage morphologique et orthographique, le gyrus temporal moyen (AB 21) avec une différence de la réduction de l'activité cérébrale pour la condition morphologique et sémantique, et le lobe frontal operculaire (qui englobe la région du gyrus frontal inférieur) sans différence significative pour les trois conditions d'amorçage. Ces résultats sont donc différents de ceux observés par Bozic et al. (2004), notamment en ce qui concerne les activations dans le lobe frontal inférieur gauche et la distinction entre la condition morphologique d'une part et les conditions sémantique et orthographique d'autre part. Il faut cependant souligner que les protocoles d'amorçage sont différents dans les deux études. Le fait que Bozic et al. (2004) observent une différence d'activation dans le gyrus frontal gauche entre la condition d'amorçage morphologique d'une part et la condition sémantique d'autre part peut s'expliquer par l'intervention de plusieurs items entre une amorce et sa cible. En effet, des études nous indiquent que l'amorçage sémantique ne perdure pas aussi longtemps que l'amorçage morphologique, et que la présentation de plusieurs items entre une amorce et une cible sémantiquement liées ne permet pas d'observer un effet d'amorçage sémantique (par ex. Bentin & Felman, 1990). Il semble qu'il soit donc compromis de s'attendre à observer des zones cérébrales activées spécifiquement dans cette condition et dans ce type

de protocole d'amorçage. Un corollaire à cette absence d'activité pour la condition sémantique est alors qu'une différence d'activation est nécessairement observée avec la condition morphologique, qui est, elle, plus robuste dans ce type de protocole.

A propos de l'étude de Devlin et al. (2004), la condition orthographique comporte des amorces composées d'un vrai suffixe. Dès lors, et comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, l'absence de différence d'activation entre cette condition et la condition morphologique peut être due au fait qu'un même traitement cognitif (de décomposition) est engagé pour ces stimuli (voir l'article de Davis, 2004 pour la même critique sur l'étude de Devlin et al., 2004). Nous proposons dans ce chapitre une étude en imagerie cérébrale qui teste les trois conditions d'amorçage : morphologique, sémantique et orthographique. Le protocole utilisé est celui d'un amorçage non masqué et conscient (aucun item ne sépare les amorces des cibles). Nous convenons que dans ce type de protocole, les effets d'amorçage peuvent être confondus avec des processus stratégiques de la part des participants. Il est par exemple possible que les participants tentent de manière consciente ou non de deviner le mot qui suit la présentation d'une amorce. Cependant, ces stratégies pourraient être spécifiques à la relation partagée entre les mots traités. De plus, cette étude présente l'intérêt d'être complémentaire des deux précédemment citées. Par ailleurs, nous avons testé nos stimuli dans un pré-test comportemental classique afin d'être sûr que ceux-ci conduisent bien à des effets d'amorçage.

5.4 Quelques mots sur la technique d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

L'imagerie fonctionnelle cherche à caractériser le cerveau en action. L'usage de cette méthode consiste à faire effectuer une tâche cognitive à des participants et à mesurer un signal qui caractérise l'activité cérébrale correspondante. Pour l'IRM, le signal mesuré est le signal BOLD (*Blood Oxygen Level Dependent*) qui reflète le taux d'oxygénation du sang dans le cerveau ou plus précisément, sa variation de concentration en désoxy-hémoglobine,

qui dépend de l'augmentation du débit sanguin. Ce phénomène constitue la réponse dite *hémodynamique* : l'afflux de sang oxygéné augmente dans les régions qui consomment de l'énergie (donc qui sont utilisées pour la tâche cognitive demandée). Pour que les cellules puissent bénéficier de l'oxygène apporté, il faut que l'hémoglobine qui transporte les molécules d'oxygène dans le sang "libère" ces dernières. Lorsque l'hémoglobine est désoxygénée, elle devient une molécule paramagnétique. C'est ce signal qui perturbe le champ magnétique dans lequel est soumis le participant. Grâce aux techniques et outils mathématiques employés, il est possible de localiser dans quelle région du cerveau il prend place.

5.5 Pré-test : Décision lexicale et effet d'amorçage

Notre objectif dans cette expérience est de tester s'il existe bien un effet d'amorçage sur les temps de réponse dans une tâche de décision lexicale quand le mot cible est précédé d'une amorce qui présente un lien morphologique, orthographique ou sémantique, par contraste à une situation où ce même mot cible est précédé d'une amorce qui ne partage pas de lien avec lui. La tâche consiste à décider si le mot qui est présenté à l'écran est un vrai mot de la langue française, ou non (il s'agit alors d'un pseudo-mot). Etant donné que nous souhaitons tester cet effet en vue d'une expérimentation en IRMf, le mot cible est toujours précédé de deux amorces (par ex. *balayeur* est précédé de *balai* et *balayer*). L'effet d'amorçage dans cette expérience est testé en comparant les temps de réponse entre la condition cible liée à l'amorce et la condition cible non liée. Nous comparons aussi les temps de réponse obtenus en fonction du type d'amorce utilisée (morphologique, orthographique ou sémantique). Nous nous attendons à obtenir un effet d'amorçage dans le cas où la cible est liée aux deux amorces, et ceci pour nos trois conditions d'amorçage.

5.5.1 Méthode

Participants

Nous avons testé 10 étudiants de l'Institut d'Etudes Politiques. Tous sont de langue maternelle française, droitiers, avec une vue normale ou corrigée. La moyenne d'âge est de 22 ans. Chaque participant est indemnisé.

Stimuli

Nous avons constitué trois listes de 40 triplets de mots partageant un lien morphologique, orthographique ou sémantique. Le troisième mot de ces triplets est le mot cible, les deux mots qui le précèdent sont les amorces. A chaque triplet de mots liés correspond un autre triplet ne partageant pas de lien ; la cible, qui est la même que dans la condition liée, est alors associée à deux pseudo-mots. Par ailleurs, dans cette condition, le mot cible est situé soit en première position dans le triplet (dans un tiers des cas), soit en seconde position, soit en troisième avec également un tiers des cas pour chaque position. Afin que les participants ne voient jamais deux fois le même mot, les stimuli ont été répartis dans deux listes expérimentales, chacune d'entre elles comportant pour une condition d'amorçage donnée (morphologique, orthographique ou sémantique) 20 triplets de mots dont la cible est liée aux amorces et 20 triplets de mots sans lien et dont la cible n'a pas été présentée dans la condition cible liée. Au cours de l'expérimentation, l'ordre de présentation des deux listes est contrebalancé. De manière à ce que nos listes expérimentales soient comparables entre elles, nous avons équilibré la fréquence des mots (d'après la base de données Lexique 2 élaborée par New, Pallier, Ferrand & Matos, 2001 ainsi que le nombre de lettres moyen entre les trois conditions d'amorce et entre les sous-listes pour une condition amorce donnée. Pour la condition amorce avec lien morphologique, la fréquence d'occurrence moyenne est de 27.3 par million ($LN = 3.3$)²⁸, et les fréquences pour les deux sous-listes sont de 28.3 ($LN = 3.3$) et de 26.4 ($LN = 3.3$). Le nombre de

²⁸LN pour Logarithme Néperien.

lettres moyen est de 7.3 (7.2 et 7.4 pour les deux sous-listes). Pour la condition lien orthographique, la fréquence moyenne est de 25.95 (LN = 3.3), les fréquences pour les deux sous-listes sont de 25.3 (LN = 3.2) et 26.6 (LN = 3.3). Le nombre de lettres moyen est de 7.1 (6.9 et 7.2 pour les sous-listes). Enfin, pour la condition avec lien sémantique, la fréquence moyenne est de 32.35 (LN = 3.5), avec des fréquences de 33.8 (LN = 3.5) et 30.9 (LN = 3.4) pour les deux sous-listes. Le nombre de lettres moyen est de 7.1 (7 et 7.2 pour les sous-listes).

Procédure

Chaque participant est testé individuellement. L'expérimentation est pilotée par un ordinateur PC grâce au logiciel DMDX (Foster & Foster, 2000). L'expérimentation commence par la présentation d'un stimulus pendant 1000 ms. Ensuite, le sujet doit décider si ce stimulus correspond ou non à un mot de la langue française. Pour cela, il dispose de deux touches de réponse situées sur le dessus d'une manette *WingMan Logitech* : une rouge, située à droite, pour répondre oui, et une noire à gauche, pour répondre non. Le stimulus suivant apparaît après la réponse du sujet. Si le sujet ne répond pas, après 2000 ms le stimulus suivant apparaît automatiquement à l'écran. La durée totale de l'expérience est de 25 minutes, et elle est ponctuée d'une pause.

5.5.2 Résultats

Une analyse de variance à mesures répétées (ANOVA) a été conduite sur les temps de réponse pour les mots cibles par sujet ($F1$) et par item ($F2$), avec deux facteurs intra-individuels : Cible (liée vs non liée aux amorces) et Amorce (lien morphologique, orthographique ou sémantique). Nous avons exclu de nos analyses les temps de réponse correspondant à des réponses erronées et ceux déviants vis-à-vis de la tâche demandée : inférieurs à 300 ms et supérieurs à 1500 ms.

L'analyse statistique indique des TR significativement plus rapides dans la condition où la cible est liée à l'amorce par rapport à la condition non liée (différence moyenne de

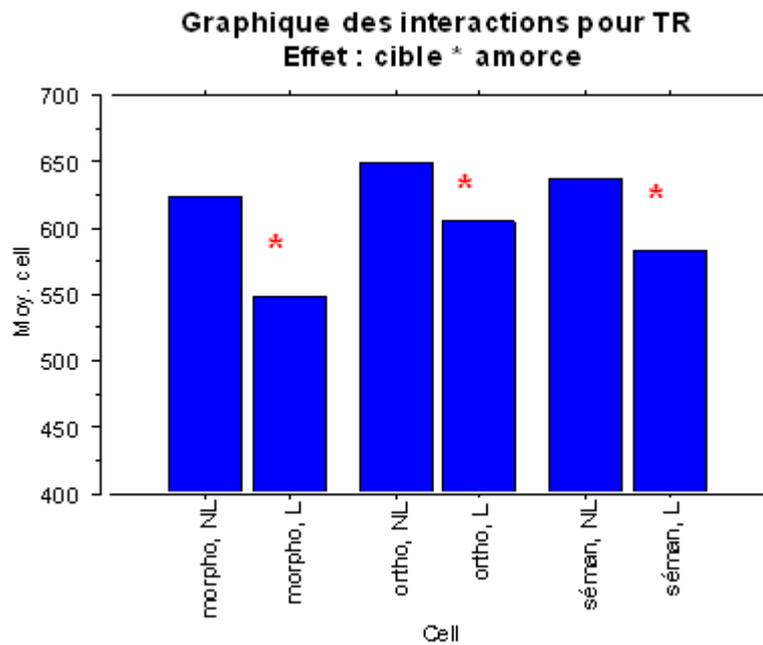


FIG. 5.1 – Interaction Cible X Amorce sur les TR dans l'Expérience 1

39 ms) [$F_1(1,9) = 40.17$ $p = .001$; $F_2(1,2) = 55.62$, $p < .001$]. Comme indiqué sur la Figure 5.1, nous obtenons en outre un effet du facteur type de lien entre les amorces et la cible. Les temps de réponse sont significativement plus courts dans la condition lien morphologique par rapport à la condition lien sémantique. Les analyses spécifiques révèlent des différences significatives dans chaque condition.

5.6 Expérience en IRMf

5.6.1 Méthode

Participants

Dix-huit étudiants ont donné leur consentement, approuvé par un comité d'éthique local de l'hôpital Michalon à Grenoble, pour participer à cette expérience. Ils étaient

tous droitiers, de langue maternelle française, et âgés entre 20 et 30 ans. Ils ont tous été indemnisés pour leur participation.

Stimuli

Les stimuli sont les mêmes que ceux utilisés dans l'expérience comportementale (pré-test). Nous résumons ici les cinq conditions expérimentales de cette étude en IRMf :

1. Triplet de mots sémantiquement liés (par ex. *personne, humain, individu*);
2. Triplet de mots orthographiquement liés (par ex. *foulure, foule, foulard*);
3. Triplet de mots morphologiquement liés (par ex. *modernité, moderne, modernisation*);
4. Triplet de mots sans lien (par ex. *banane, vélo, domaine*);
5. Triplet de suites de lettres (par ex. *ggggg, mmmm, ffff*).

La répartition des conditions dans les listes expérimentales est différente de celle de l'Expérience 1 car nous avons dû adapter l'expérience au protocole IRM. Deux listes présentées en deux sessions ont été construites dans lesquelles l'ordre de présentation des triplets n'est pas aléatoire mais suit une répartition en block comme suit : 4 triplets de mots d'une même condition sont présentés à la suite, puis 4 autres triplets d'une autre condition etc.

Procédure

Un paradigme par épisode pseudo-randomisé a été utilisé. Chaque participant passe deux acquisitions fonctionnelles (ce qui fait deux sessions) entrecoupées d'une acquisition anatomique. Dans les deux acquisitions fonctionnelles, les 5 conditions expérimentales sont présentées 5 fois avec à chaque fois 4 triplets de mots partageant un lien (lien qui

varie en fonction de la condition expérimentale). Chaque stimulus dans ces triplets est présenté pendant une durée de 1.5 seconde, avec un SOA de 0.5 seconde.

Un pseudo-mot est toujours inséré dans un des 4 triplets de mot présentés à la suite, afin de vérifier que les participants lisent bien les mots présentés à l'écran (pour ces pseudo-mots ils avaient pour consigne d'appuyer sur un bouton). L'emplacement du pseudo-mot, en première ou dernière position du triplet, permet de ne pas perturber l'effet d'amorçage, qui est toujours présent quand deux stimuli liés se succèdent. Dans le cas de la condition suite de lettres, la réduplication d'une paire de deux lettres différentes (par ex. *mlmlm*) était présentée à la place du pseudo-mot.

Un point de fixation central était présenté à l'écran entre chaque item dans le but d'encourager les participants à fixer le centre de l'écran. La durée totale de chaque session était de 10 minutes. Les stimuli étaient projetés sur un écran vidéo placé derrière le scanner. Le miroir placé à l'intérieur de ce dernier, au dessus des yeux du participant, reflète ce qui s'inscrit sur l'écran de manière claire et confortable. Une souris (compatible avec l'installation dans un champ magnétique) est à disposition de la main droite des participants afin qu'ils puissent appuyer lorsqu'ils aperçoivent un pseudo-mot ou une suite de lettres constituée de deux lettres différentes. La présentation des stimuli et la mesure des temps de réponse des sujets sont contrôlées grâce au logiciel PsyScope.

Acquisition IRM

Les sujets ont été examinés au moyen d'un imageur à 3 Tesla (Bruker) équipé de la technique écho-planaire (EPI). Le volume d'exploration était composé de 41 coupes adjacentes de 3.5 mm d'épaisseur parallèles au plan bi-commisural et centrées sur le gyrus frontal inférieur. Les images fonctionnelles ont été obtenues au moyen de séquences sensibles au contraste BOLD.

5.6.2 Résultats

300 volumes ont été acquis par session pour chaque participant. Nous avons utilisé la méthode SPM (Statistical Parametric Mapping, Friston et al., 1995) qui permet d'effectuer des analyses statistiques individuelles et de groupe. L'analyse des données a été effectuée avec le logiciel SPM2 sur un ordinateur PC sous environnement Matlab.

Pré traitements

Le traitement SPM d'un examen comprend les étapes suivantes. Lors d'une acquisition fonctionnelle, les différentes coupes d'un même volume ne sont pas acquises simultanément, mais successivement (dans notre étude en mode séquentiel) pendant une durée égale à 3 TR (temps de répétition). Evidemment, l'impact de ce décalage est particulièrement important pour les acquisitions. Une première correction apportée est le "*slice timing*" qui consiste à "ramener", par interpolation temporelle, l'instant d'acquisition de toutes les coupes à un instant commun, qui est l'instant d'acquisition d'une des coupes du volume (que l'on qualifie de *coupe de référence*). La série des volumes fonctionnels est ensuite réalignée sur le premier volume acquis afin de corriger les mouvements de tête (*recalage*). Après le recalage, les volumes sont "normalisés" à l'aide d'une opération non linéaire afin qu'ils puissent se confondre avec un volume de référence ("*template*"). Ce *template* symétrique a été créé en moyennant le *template* standard et son image miroir par rapport au plan sagittal médian. Après lissage spatial de ces volumes "normalisés" une série d'images fonctionnelles "endroit" est obtenue (l'hémisphère gauche est représenté à gauche des volumes fonctionnels).

Analyses statistiques

Le modèle linéaire général (GLM, *general linear model*) est utilisé afin d'effectuer les tests univariés appropriés au niveau de chaque voxel. Les inférences quant aux effets qui ont été introduits délibérément dans l'expérience sont basées sur des statistiques de type *t* de Student. Pour l'analyse de groupe, nous avons utilisé la méthode d'analyse RFX qui

repose sur le calcul des contrastes entre la tâche et le contrôle : [T *vs.* C]. L'identification précise des aires activées sur les cartes fonctionnelles (cf. le tableau 5.1 en fin de ce chapitre) a été faite sur base de l'atlas de Talairach et Tournoux (1988).

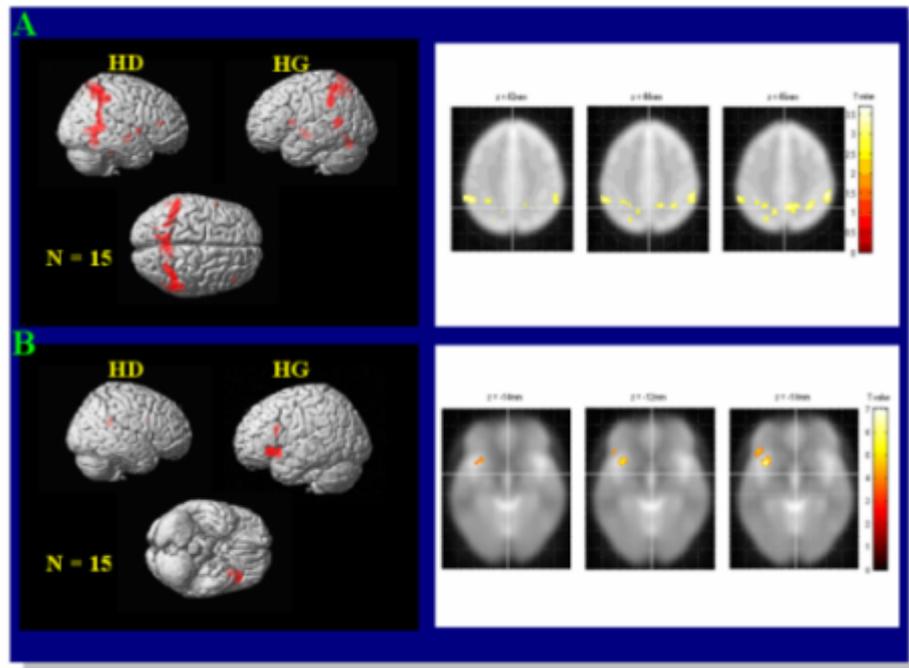


FIG. 5.2 – Résultat de d’analyses de groupe. Figure A : activations cérébrales significatives ($p < .001$) pour le contraste Let *vs.* SL. Figure B : activations significatives ($p < .001$) pour le contraste Mots *vs.* Let.

La Figure 5.2 A montre des activations cérébrales significatives ($p < .001$) obtenues pour le contraste entre les deux conditions contrôles “Lettres *vs.* SL”, pour 15 participants, projetées sur des modèles anatomiques 3D et 2D (le modèle 2D correspond à des coupes transversales opérées à des niveaux différents par rapport au plan bi-commissural et présentées en convention neurologique, c’est-à-dire avec l’hémisphère gauche du cerveau à gauche sur nos figures). Les régions significativement activées qui ont été identifiées à partir de l’atlas anatomique de Talairach, correspondent au lobe pariétal supérieur bilatéral (AB 7), au gyrus temporal médian bilatéral (AB 21) et au gyrus supra marginal gauche

(AB 40).

La Figure 5.2 B résume les activations cérébrales significatives ($p < .001$) obtenues pour le contraste Mots vs. Lettres sur une analyse de groupe de 15 participants, projetées sur des modèles anatomiques 3D et 2D. Ce contraste a pour objectif d'identifier le circuit neuronal activé au cours du traitement lexical des mots. On peut tout d'abord observer que les activations sont principalement localisées dans l'hémisphère gauche, ce qui est cohérent puisque celui-ci est considéré comme l'aire du langage chez la très grande majorité des droitiers (Gabrieli, Russell, Poldrack & Desmond, 1998). Plus précisément, les régions significativement activées identifiées à partir de l'atlas anatomique de Talairach, correspondent au gyrus temporal supérieur (AB 38), au gyrus frontal inférieur gauche (AB 44, aire de Broca), et au lobule pariétal inférieur droit (AB 40). Nous avons également étudié les activations significatives pour les contrastes suivants : Morpho vs SL, Seman vs. SL et Ortho vs. SL. Le but est ici d'identifier si l'amorçage morphologique présente des particularités au niveau des régions qu'il active ou du signal hémodynamique en rapport avec les conditions d'amorçage sémantique et orthographique.

La Figure 5.3 C montre les activations cérébrales significatives ($p < .01$) obtenues pour le contraste entre la condition Morphologique et la condition Sans Lien. Les régions significativement activées correspondent aux lobes pariéaux inférieurs gauche et droit (AB 40), au gyrus frontal inférieur gauche (AB 47), et au lobule pariétal supérieur gauche (AB 7/ 40). La Figure 5.3 D montre les activations cérébrales significatives ($p < .001$) obtenues pour le contraste entre la condition Sémantique et la condition Sans Lien. Les régions significativement activées correspondent au Gyrus pre-centralis (AB 6/44), au gyrus frontal inférieur gauche (AB 45). La Figure 5.3 E montre les activations cérébrales significatives ($p < .01$) obtenues pour le contraste entre la condition Orthographique et la condition Sans Lien. Les régions significativement activées correspondent au fornix, au gyrus temporal supérieur droit (AB 22), au gyrus frontal inférieur (AB 44) et au lobule pariétal supérieur gauche (AB 7/40).

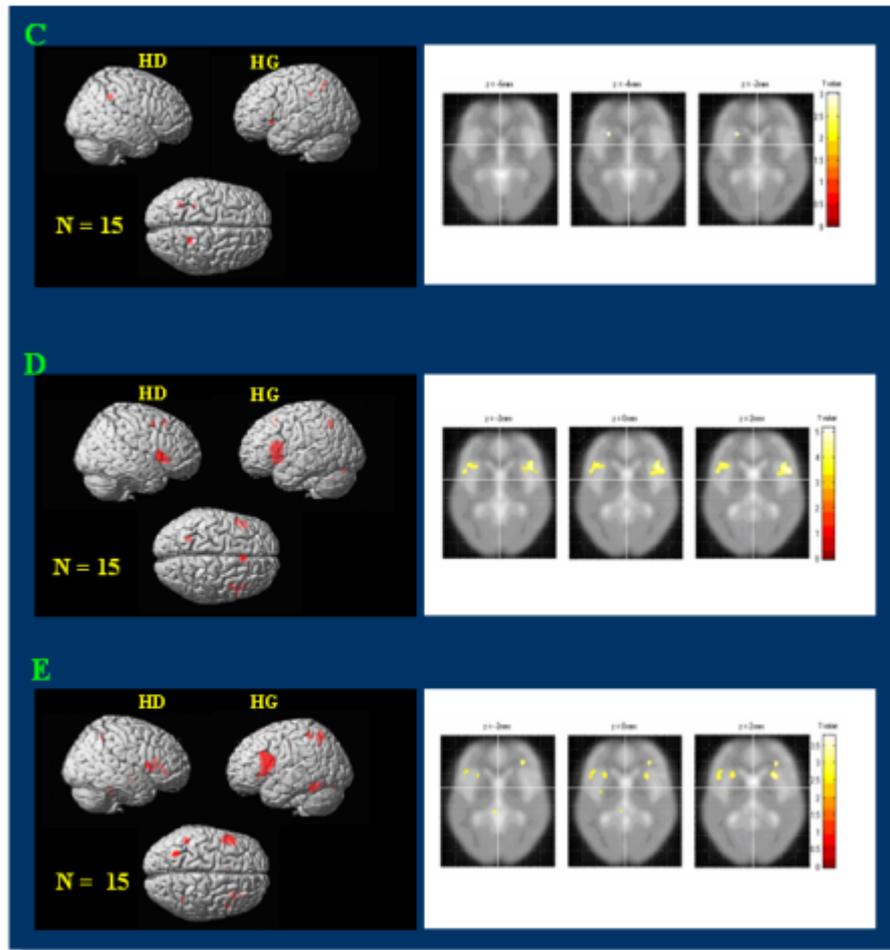


FIG. 5.3 – Résultat des analyses de groupe. Figure C : activations cérébrales significatives ($p < .01$) projetées sur des modèles anatomiques 3D pour le contraste Morpho *vs.* SL. Figure D : activations cérébrales significatives ($p < .001$) pour le contraste Seman *vs.* SL. Figure E : activations cérébrales significatives ($p < .01$) pour le contrast Ortho *vs.* SL

Analyse du signal au sein des régions d'intérêt

Cette analyse est conduite en définissant au préalable et de manière tridimensionnelle, des régions anatomiques sur lesquelles les hypothèses de travail ont été construites. Ces régions sont dénommées “*Region Of Interest*” en anglais et désignées par l'acronyme ROI. A l'intérieur de ces volumes, il est réalisé une estimation de la valeur du signal en fonction des conditions expérimentales par l'utilisation de la *tool box* “MarsBar”. Ces valeurs peuvent être ensuite analysées de manière statistique (ANOVA). Plusieurs ROI ont été analysées : le gyrus frontal inférieur gauche GF_i [-26 18 -2 (AB 47); -46 24 14 (AB 44); -46 14 14, (AB 44)] et le lobule pariétal supérieur, LPs [-28 -60 56 (AB 7/40)].

Dans la région d'intérêt GF_i AB 47, aucun effet de la condition d'amorçage n'est observé [$F_{s} < 1$].

Dans la région d'intérêt GF_i AB 45, nous observons un effet de la condition d'amorçage [$F1(2,14) = 3.90, p = .007$]. Une analyse plus fine révèle une différence significative entre les conditions d'amorçage orthographique et morphologique [$F1(1,14) = 4.28, p = .057$], avec une diminution d'activation plus importante pour la condition morphologique. Nous observons aussi une différence significative entre les conditions d'amorçage sémantique et morphologique [$F1(1,14) = 7.505, p = .016$], là encore avec une diminution d'activation plus importante dans la condition morphologique. Il n'y a pas de différence significative entre les conditions orthographique et sémantique [$F1(1,14) = 2.75, n.s.$] (Voir Figure 5.4).

Dans la région d'intérêt GF_i AB 44, nous observons un effet de la condition d'amorçage [$F1(2,14) = 4.93, p = .01$]. Une analyse plus fine montre une différence pour la variation d'activation entre les conditions orthographique et morphologique [$F1(1,14) = 4.20, p = .05$] avec la condition morphologique qui induit une diminution d'activation plus importante. Nous observons également un effet significatif entre les conditions sémantique et morphologique [$F(1,14) = 7.02, p = .01$], avec toujours une diminution d'activation plus importante pour la condition morphologique. Aucune différence d'activation n'est observée entre les conditions sémantique et orthographique [$F(1,14) = 1.71, n.s.$].

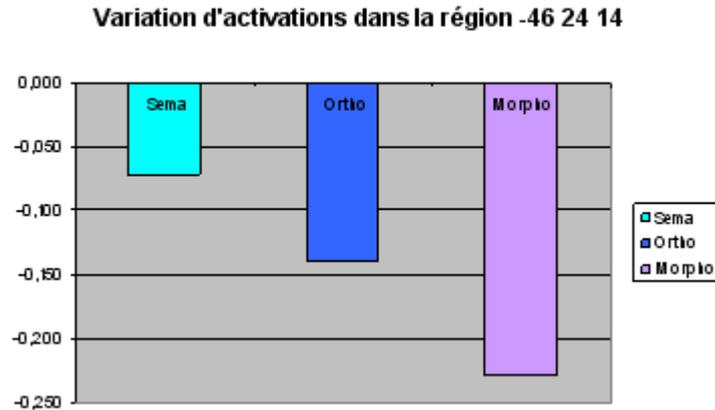


FIG. 5.4 – Variation d'activations pour la région d'intérêt : GF*i*.

Concernant les analyses statistiques dans la région d'intérêt LPs, aucun effet significatif de la variation d'activation en fonction de la condition d'amorçage n'est observé [$F1(2,14) = 1.70$, n.s]. Néanmoins, des analyses plus fines révèlent une variation d'activation significative entre les conditions orthographique et morphologique, avec une variation plus importante pour la condition morphologique [$F1(1,14) = 5.24$, $p = .03$]. Aucune différence n'est obtenue entre les conditions sémantique et orthographique [$F1(1,14) < 1$]. Enfin, aucun effet n'est observé entre la variation d'activation pour les conditions sémantique et morphologique [$F1(1,14) = 1.37$, n.s].

5.7 Discussion Générale

Les résultats que nous avons obtenus dans cette étude en imagerie cérébrale montrent deux principales régions cérébrales activées et communes dans nos trois conditions d'amorçage : le gyrus frontal inférieur gauche et la région supérieure du lobe pariétal gauche. Les analyses statistiques réalisées plus spécifiquement sur ces régions ne montrent aucune différence de variation d'activation qui soit significative entre les trois conditions d'amorçage pour la région du lobe pariétal gauche (AB 7/40) et la partie ventrale du

gyrus frontal inférieur gauche (AB 47). Concernant les variations d'activation dans la partie dorsale du gyrus inférieur gauche (AB 45) et l'aire de Broca (AB 44), nous observons une diminution d'activation significativement plus importante pour la condition d'amorçage morphologique vis-à-vis des conditions orthographique et sémantique. En revanche, aucune différence de variation d'activation n'est observée entre ces deux dernières conditions.

Effet d'amorçage et activité cérébrale

Ces dernières années, de nombreux travaux menés en imagerie cérébrale, comme l'IRMf ou la TEP (Tomographie par Emission de Positons), ont permis d'étudier les bases neuronales associées à l'effet d'amorçage. Cet effet correspond, dans les études menées en comportemental, à des temps de réponse plus courts dans la condition où le mot cible est présenté après une amorce avec laquelle il partage un lien. Dans les études en IRMf ou en TEP, cet effet consiste en une baisse d'activité des neurones de la région concernée par le traitement en cours (Badgaiyan & al., 2001 ; Buckner & al., 1999, 2000 ; Desimone, 1996 ; Thiel & al., 2001). Par exemple, Buckner et al. (1999) observent que la production orale de mots suite à leur présentation écrite est corrélée avec une réduction de l'activité cérébrale dans les cortex frontal et temporal inférieurs, et dans une moindre mesure dans des régions visuelles primaires, lorsque les mots ont déjà été étudiés par les sujets au préalable.

Discussion de nos résultats et de ceux de Bozic et al. (2004) et de Devlin et al. (2004)

Bozic et al. (2002) observent, comme dans notre étude, des activations dans le cortex inférieur frontal gauche pour la condition d'amorçage morphologique. En revanche, concernant les conditions sémantique et orthographique, aucune activation dans cette région n'est observée contrairement à nos propres résultats. Nous supposons que le protocole d'amorçage qui est non masqué chez Bozic et collaborateurs, mais qui comprend la présen-

tation de plusieurs items entre deux items qui partagent un lien, pourrait expliquer cette différence de résultats. En effet, cette procédure, contrairement à la notre, peut diminuer la mise en place de stratégies : les participants sont moins à même de distinguer que certains mots proposés partagent des liens à cause des items qui les séparent. Or, des études ont montré que ce sont justement des procédures automatiques (propagation d'activation) et/ou contrôlées (stratégies) qui produisent l'effet d'amorçage sémantique (Neely, 1991) et qui activent la région du cortex frontal inférieur gauche (Copland et al., 2003). Kotz et al. (2002) suggèrent que la diminution d'activation dans cette dernière région pourrait être due à une charge cognitive réduite du processus de récupération des représentations sémantiques, ceci par le biais d'une activation préalable des représentations de certains candidats par un amorçage automatique ou contrôlé. Concernant nos résultats et étant donné l'utilisation d'une procédure d'amorçage non masqué, nous pouvons retenir les mêmes arguments que ceux cités ci-dessus pour expliquer la diminution d'activation dans le cortex frontal inférieur pour la condition d'amorçage sémantique ; ces arguments sont peut-être également valables pour la condition d'amorçage orthographique.

L'étude de Devlin et al. (2002), dans laquelle est utilisée un protocole d'amorçage masqué, ne montre pas de différence d'activation entre les trois conditions d'amorçage sémantique, orthographique et morphologique, dans la région frontale inférieure gauche. Néanmoins, et comme nous l'avons déjà signalé dans l'introduction de ce chapitre, la condition orthographique comporte des amorces composées d'un vrai suffixe. Ceci, surtout dans le cadre d'un amorçage masqué, conduit à la mise en place d'une procédure de décomposition comme pour les mots polymorphémiques. Ceci peut donc diminuer très fortement les chances d'observer une différence d'activation entre les variations d'activation de ces deux conditions d'amorçage. Par ailleurs, dans notre étude, une différence de variation d'activation entre la condition morphologique d'une part, et les conditions orthographique et sémantique d'autre part, se distingue uniquement dans des régions précises (AB 44/45) de la région frontale inférieure. Nous discutons ce résultat dans la section suivante.

Amorçage morphologique et réduction d'activation dans l'aire AB 44/45

Concernant notre étude, un résultat qui attire tout particulièrement notre attention concerne la diminution d'activation dans la partie dorsale de la région frontale inférieure gauche (AB 44/45) dans la condition d'amorçage morphologique vis-à-vis des conditions sémantique et orthographique. Deux études, une de Noppeney et Price (2002) et une de Tyler et al. (2002), nous aide à comprendre ce que nous indique ce résultat quant au mode de traitement des mots polymorphémiques. L'étude en TEP de Noppeney et Price (2002) présente les substrats neuronaux associés aux deux tâches cognitives suivantes :

1. Répéter à voix basse le mot entendu ;
2. Décider si deux mots sont sémantique liés (les participants doivent décider si le premier mot écouté concerne la catégorie sémantique du second).

Les conditions contrôles pour ces deux tâches sont respectivement :

1. L'écoute d'un non mot²⁹ pour lequel les participants qui doivent répondre "ok" à voix basse à cet item ;
2. Décider si la voix qui a prononcé le non mot est une voix masculine ou féminine.

Les résultats observés montrent que la tâche de décision sémantique est corrélée à une augmentation de l'activité cérébrale dans la partie ventrale inférieure gauche du cortex frontal (AB 47), et les deux tâches (décision sémantique et répétition) à une augmentation de l'activité dans le cortex frontal inférieur gauche (AB 44/45). Ces résultats suggèrent le rôle des AB 44/45 dans le traitement d'informations sémantiques et phonologiques.

Concernant nos résultats, nous proposons suite aux arguments précédents de faire le lien entre la diminution d'activation observée dans les régions AB 44 et 45 dans la condition d'amorçage morphologique avec le fait que ces régions semblent être impliquées dans le traitement sémantique et phonologique des mots. Pour établir ce lien, nous nous rapportons à l'étude de Tyler et al. (2002) qui défendent une version de la "*Dual route hypothesis*". Cette hypothèse prévoit que la voie décompositionnelle engagée dans le traitement lexi-

²⁹Un mot en parole inversée pour lequel il n'y a pas de correspondance sémantique

cal des mots polymorphémiques est sous-tendue par un mécanisme morfo-phonologique. Pour défendre cette idée, les auteurs ont conduit une étude sur des patients en difficultés pour traiter les formes verbales régulières, mais aux habiletés préservées pour le traitement des formes irrégulières (par exemple dans des tâches de production à voix haute de formes verbales, ou en décision lexicale en protocole d’amorçage, Marslen-Wilson & Tyler, 1998; Tyler & al., 2002). Les patients doivent décider si les deux items qu’ils entendent successivement sont identiques ou non, cela dans six conditions expérimentales. Les deux items sont composés :

1. D’une forme verbale régulière et de sa racine, par ex. *played-play* du verbe *to play*, ‘jouer’ ;
2. D’une forme verbale irrégulière et de sa racine, par ex. *taught-teach* du verbe *to teach*, ‘enseigner’ ;
3. De deux mots monomorphémiques “pseudo-réguliers” dont le premier à une forme phonologique proche de celle d’une forme verbale régulière, par ex. *trade-tray* ;
4. De deux mots monomorphémiques “pseudo-irréguliers” dont le premier à une forme phonologique qui est proche de celle d’un verbe irrégulier au passé, par ex. *port-peach* ;
5. De deux “pseudo-mots polymorphémiques pseudo-réguliers”, le premier à une forme phonologique proche de celle d’un verbe régulier au passé, par ex. *nugged-nug* ;
6. De deux “pseudo-mots polymorphémiques pseudo-irréguliers”, le premier avec une forme phonologique proche de celle d’un verbe irrégulier au passé (*hort-heach*).

Les résultats obtenus montrent qu’il n’y a pas de différence entre le temps mis pour répondre quand la paire d’items correspond à une forme verbale irrégulière et sa racine et les conditions “pseudo-irrégulier” et “pseudo-mot polymorphémique pseudo-irrégulier”. Concernant les verbes réguliers, les performances obtenues montrent que les patients produisent des temps de réponse significativement plus élevés pour cette condition que pour les conditions “pseudo-régulier” et “pseudo-mot polymorphémique pseudo-réguliers”. ces

derniers ont une construction phonologique très proches des verbes réguliers, mais ne nécessitent pas de procédure décompositionnelle pour être traitées. Les temps de réponse plus longs dans la condition des formes verbales régulières seraient dus au fait que pour ces items uniquement, une procédure morpho-phonologique spécifique est impliquée dans la décomposition des formes polymorphémiques. Cette procédure serait atteinte chez les patients étudiés, et le traitement phonologique classique, comme le suggèrent les bonnes performances dans les conditions où le premier mot de chaque paire est monomorphémique ou sans représentation lexicale.

Nous proposons en ce qui concerne nos résultats que dans la condition d'amorçage morphologique, les amorces qui sont des mots polymorphémiques requièrent d'être traitées via la procédure spécifique de décomposition morphophonologique, qui pourrait être sous-tendue par les régions AB 44/45. Ces régions se désactivent petit à petit en condition d'amorçage étant donné que les représentations sémantiques sont plus faciles à activer, et puisque les participants peuvent mettre en place des procédures stratégiques qui permettent de pré-activer les représentations des mots d'une même famille morphologique susceptibles d'être candidats pour le prochain mot présenté.

5.8 Conclusion

Peu d'études en IRMf ont été menées pour étudier le substrat neuronal qui sous-tend les effets d'amorçage sémantique, orthographique et morphologique. Par ailleurs, les protocoles d'amorçage utilisés sont déterminant pour les résultats obtenus, ce qui limite la comparaison de nos résultats avec ceux d'autres auteurs. Concernant les études menées en neuropsychologie, plusieurs d'entre elles ont montré que des patients atteints de lésions dans le cortex inférieur frontal gauche ne montrent pas d'effet d'amorçage morphologique, sans trouble particulier pour les autres conditions d'amorçage (comme l'amorçage sémantique). Ces études suggèrent également que ce déficit d'amorçage est dû à un traitement décompositionnel morphophonologique qui ne se réalise pas chez ces patients (Longworth

& al., 2005). Étant donné que les lésions cérébrales sont généralement diffuses, c'est l'ensemble de la région frontale inférieure qui est alors "incriminée" comme étant à la base du déficit d'amorçage morphologique, mais des études plus détaillées pourraient mettre en évidence une implication plus précise de la partie dorsale de ces régions des aires de Brodman 44/45, et soutenir ainsi nos observations.

- Ce projet a été réalisé grâce au financement de l'Université de Savoie attribué au Pr. Pascale Colé, et grâce aux collaborations menées avec :
 - Laurent LAMALLE et Irène TROPRES de l'unité IRM 3T du CHU Michallon à Grenoble ;
 - Dr. Monica BACIU et Emilie COUSIN de l'Université Pierre Mendès France, Grenoble ;
 - Dr. Férath Kérif du MRC-CBU, Cambridge (GB).

Contrastes	Région	H	BA	k	x	y	z	T
<i>Let vs. SL</i>	Lobe Pariétal Supérieur	D	7	853	6	-54	54	5.35
	Lobe Pariétal Supérieur	G	7	-	-8	-60	54	3.85
	Gyrus Temporal médian	D	21	1695	58	-50	6	4.66
	Gyrus Supra Marginal	G	40	667	-52	-44	36	4.07
	Gyrus Temporal Médian	G	21	188	-42	-10	-8	3.74
<i>Mots vs. Let</i>	Gyrus Temporal Supérieur	G	38	297	-34	12	-8	7.67
	Lobule Pariétal Inférieur	D	40	82	26	-44	24	4.82
	Gyrus Frontal Inférieur	G	44	36	-42	16	16	4.06
<i>Morpho vs. SL</i>	Lobule Pariétal Inférieur	G	40	16	-30	-36	38	3.39
	Lobe pariétal inférieur	D	40	77	18	-44	38	3.32
	Gyrus Frontal Inférieur	G	47	16	-26	18	-2	3.05
<i>Séman vs. SL</i>	Gyrus Pre Centralis	D	6/44	344	50	14	6	6.26
	Precuneus	G	7	101	-24	-58	50	6.09
	Gyrus Frontal Inférieur	G	45	565	-46	24	14	5.22
	Lobule Parietal Supérieur	G	7	9	-34	-58	54	2.96
<i>Ortho vs. SL</i>	Fornix	D	28	135	16	-12	-8	4.70
	Gyrus Temporal Supérieur	D	22	360	30	18	6	4.15
	Gyrus Frontal Inférieur	G	44	751	-46	14	14	4.12
	Lobule Parietal Supérieur	G	7	150	-28	-60	56	3.69

TAB. 5.1 – Récapitulatif des activations observées en fonctions des contrastes étudiés.